

効率の良いネットワーク内処理のための ノード選択指標の提案

鄭 顕志^{†1,†2} 深澤良彰^{†1} 本位田真一^{†2,†3}

携帯端末で構成される MANET では、通信データ量を低減させることで限られた無線帯域やバッテリーの消費を抑えることが重要となる。通信データ量を低減させる手法として、通常 MANET 外で行われるデータ処理を MANET 内部のノード上で実行するようなネットワーク内処理が有効であることが知られている。データ収集による通信データ量を低減させるためには、ネットワーク内処理を配備するノードを適切に選択する必要がある。複数のデータ源から MANET を介してデータを収集する場合、各データ源の配置や提供データ量の差異によって各ノードの通信データ量に偏りが生じる。しかし、従来のノード選択指標では、ノードの位置やネットワークポロジのみに基づいているため、通信データ量の偏りを考慮に入れておらず、十分にデータ量を低減させることができるノードを選択できなかった。そこで、本論文では、データ源の情報に基づいたネットワーク内処理配備ノード選択指標 COLOR を提案する。COLOR は、あるノードにネットワーク内処理を配備してデータ収集を行った場合に生じる総通信データ量の推定値を表し、COLOR が最小となるノードをネットワーク内処理の配備ノードとして選択する。COLOR は、データ通信量の各データ源の位置と提供データ量に基づいて算出される。これらのデータ源に関する情報は、ネットワーク内処理による通常のデータ収集時に同時に収集されるため、少量のオーバーヘッドで算出することが可能となる。シミュレーション結果より、正方地域の 4 隅にデータ源があり、1 つのデータ源が他のデータ源の 4 倍のデータ量を有する場合、従来の指標を用いた場合と比べて、平均で 7 割程度の通信データ量でデータを収集することを確認した。

A Node Selection Metric for Energy Efficient In-network Processing

KENJI TEI,^{†1,†2} YOSHIAKI FUKAZAWA^{†1}
and SHINICHI HONIDEN^{†2,†3}

In-network processing is a powerful technique to reduce communication traffic

in an ad-hoc network where energy efficiency is a critical issue. In the case that an in-network process retrieves data from multiple data sources, the node which hosts the in-network process should be carefully chosen to reduce the amount of necessary traffic. Conventional metrics to select a host node are insufficient in this case, because they do not consider differences in the amount of data provided by each data source. In this paper, we propose the COLOR metric to solve this problem. COLOR uses estimated locations of data sources and the amount of data which they provide so that a data source which provides more data than others has a stronger effect than the others. Moreover, overhead associated with COLOR is small, because meta-data of data sources used in COLOR can be retrieved during a data retrieval phase which in-network processing ordinarily does. Simulation results showed that data retrieval with COLOR consumes less resources than that with conventional metrics in an environment where placements of data sources and the amount of data are nonuniform.

1. はじめに

モバイルアドホックネットワーク (MANET: Mobile Ad-hoc Network) は、その設置容易性から、被災地における簡易ネットワークとしての期待が高まっている。被災地における災害救助において、地域内に設置されている RF-ID リポジトリや無線通信可能なセンサ群などのデータ源から得られるデータは、火災や要救助者の有無など災害救助に有用な情報を導出できるため重要である。通常、それらのデータ源は、近隣の携帯端末から近距離無線通信によって直接アクセスされるか、データ源自体が固定ネットワークへ接続されネットワーク越しにアクセスされることにより、保持するデータを提供する。しかし、災害によって固定ネットワークに物理的障害が発生した場合、データ源がネットワークから孤立し、地理的に離れた情報収集者がデータを収集することが困難になってしまう。このような場合でも、被災者や救援者が持つ PDA や携帯電話などの携帯端末で構築した MANET を代替ネットワークとして使用することで、地理的に離れたデータ源からデータを収集することが容易になる。データ源に近接する携帯端末がデータ源に近距離無線通信でアクセスすることでデータを取得し、取得したデータを MANET を経由して情報収集者に転送することで災害救助

^{†1} 早稲田大学
Waseda University
^{†2} 国立情報学研究所
National Institute of Informatics
^{†3} 東京大学
The University of Tokyo

に有用なデータを遠距離からでも容易に収集することができる。

各ノードの通信帯域が狭くバッテリー制約が厳しい MANET では、データ通信量を低減させることが求められる。特に、遠距離のデータ源群からデータを収集する場合、データ源に近接するノードが得たデータが多数の中継ノードを経由して送信されるため、通信量が多くなってしまふ。データ収集による通信データ量を低減させるための手法として、ネットワーク内処理 (in-network processing) が有効であることが知られている¹⁾⁻⁵⁾。この手法では、データ集約やデータ融合といった、データの解析処理 (以降、これらの処理を実行するプロセスを Processing Element: PE と記す) をネットワーク内部のノード上で実行する。PE はデータ源近隣のノードに配備され、少ない通信ホップ数でデータ源に近接するノードからデータを収集し、収集したデータに対し解析処理を実行し、データ量を低減させた解析結果のみを報告する。解析処理をネットワーク内部で行うことによって、データ量の多い生データはネットワーク内の局所的な通信で収集し、データ量を低減させた解析結果のみを送信することで、総合的な通信データ量を低減させることができる。

ネットワーク内処理を用いる場合、PE の配備ノードを適切に選択する必要がある。各データ源に近接するノード群から PE が配備されたノードまでの間は何の処理も施されていない生データが送信されてしまうため、PE をどのノードに配備するかによって、生じる通信量は変化する。適切な配備ノードを選択するためには、PE とデータを提供するノード群間の通信量を推定し、その推定量が最小となるように PE を配備するノードを選択する必要がある。したがって、PE を配備するためのノードを選択する指標には次の 2 点が求められる。

- 通信量を高精度で推定
- 推定に使用するデータを少量のオーバーヘッドで収集

まず、ノード選択指標は実際の通信量の大きさを反映していなければならない。指標に基づいてノード A の評価値がノード B の評価値より良い場合、PE をノード A に配備した場合に生じる総通信量は、ノード B に配備した場合に生じる通信量より小さくなければならない。また、評価値算出のために用いられる入力データ自体の収集にも通信が必要となるため、その取得のための通信オーバーヘッドも考慮する必要がある。

これまで、選択指標は、ノードの情報に基づいた指標が提案されてきた。ノード情報に基づいた選択手法では、ネットワークトポロジ⁶⁾⁻⁸⁾ や地理情報^{5),9),10)} に基づいた指標が提案されている。しかし、これらの指標では、どのノードがどれだけの量のデータを送信するかを考慮していない。各ノードの通信量は、データ源からデータを直接取得したノードと PE が配備されたノード間の通信経路や、データ源から得られるデータサイズによって異なる。

したがって、これらの指標では、データ源の配置や提供データ量にばらつきがある場合、通信量を正確に推定することは困難である。

本論文では、データ源の情報に基づいて PE 配備ノードを選択する選択指標 Cost Of Location for Relocation (COLOR) を提案する。COLOR では、各データ源の位置と取得可能なデータ量を用いることで、配備ノードにおける総通信量を推定する。ノードとデータ源の位置関係によって、PE によるデータ収集取得に関連するデータ源は異なるが、本論文で提案するノード選択手法では、データ収集過程時において得られた情報から通信量に影響を与えるデータ源を判定し、そのデータ源の位置とその提供データ量の推定値から COLOR 指標を算出する。また、データ源の位置と取得可能なデータ量などのデータ源のに関するメタデータは、PE が各データ源からデータを収集する過程において同時に収集可能であり、メタデータ収集のための通信オーバーヘッドは他の指標の場合と比べて小さい。したがって、COLOR に基づいた PE 配備ノード選択指標を用いることで、より通信量を低減させたデータ収集が可能となる。

本論文の構成を次に述べる。本章では研究背景を述べた。2 章で問題を定義し、3 章で既存の選択指標を示す。4 章で COLOR の詳細を示し、5 章で COLOR の有効性について議論する。6 章でシミュレーション結果に基づいて COLOR の有効性を検討し、7 章でまとめを述べる。

2. 問題定義

本章では PE の動作概要を示し、配備ノード選択指標の適用箇所を示す。また、配備ノード選択問題の詳細を示す。

2.1 PE の動的再配備への適用

文献 5), 10) で述べられている PE の動作概要を図 1 示す。PE の動作はデータ収集フェーズ (Data Retrieval Phase) と配備フェーズ (Deployment Phase) から構成される。データ収集フェーズでは、PE はデータ収集のクエリをネットワーク内にフラッディングし、データを収集する。クエリを受け取ったノードは、自身の近隣にデータ源が存在するかを判定し、データ源が存在する場合データ源から近距離無線通信でデータを取得し、取得したデータを PE が配備されているノードに送信する。以降、データ源近隣に位置し、データ源からデータを取得可能なノードを、データ提供ノードと呼ぶ。PE は、受け取ったデータに対し、データ集約やデータ融合などの処理を行う。ネットワークトポロジの変化やアクセス可能なデータ源の変化に対応するため、定期的にデータ収集を繰り返す。

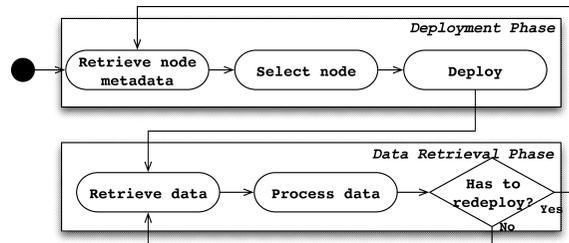


図 1 PE の動作概要
Fig. 1 Flowchart of PE.

PE では、ネットワークトポロジやノード位置の変化に対応して、通信量を小さく保つために動的に配備ノードを変更することができる。PE は定期的に再配備を開始するかどうかを判定する。別ノードへの再配備を開始する条件としては、一定時間の経過による条件¹¹⁾や、他のノードとの通信ホップ数による条件⁴⁾、ノードの位置情報や速度情報による条件⁵⁾などが提案されている。これらの条件は、再配備による通信オーバーヘッドを低減させるために、不必要な再配備を防ぎ、適切な再配備頻度を保つことを目的としている。実際に、文献 5) では、ノードの位置情報や速度情報による条件を再配備の開始条件とすることで、再配備を行わない場合と比較して総通信量を低減させることができることを示している。本論文でもこれらの再配備条件を用いることとする。

再配備の開始条件に基づき別ノードへの配備を決定した場合、PE は配備フェーズに入る。配備フェーズでは、PE はネットワーク上にノード検索クエリをフラッディングし、配備先ノードの選択に必要なメタデータを各ノードから収集する。PE は、収集したノードのメタデータを基に、ノード選択指標に基づいて各ノードを評価し、最良のノードを選択する。配備先のノードが選択されると、PE は実行を中断し、自身のプログラムコード、収集済みデータ、解析結果などを再配備先のノードに送信し、再配備先ノード上でデータ収集フェーズを再開する。

PE によるデータ収集における通信量の大部分は、PE 配備ノードとデータ提供ノード間でのデータ通信によって占められる。ノード選択は、PE 配備ノードとデータ提供ノード間でのデータ通信量を大きく左右するため、データ通信量を低減するために非常に重要である。したがって、本論文ではデータ通信量を低減させるために適切なノード選択指標を提案する。

2.2 ノード選択問題の詳細

本論文で対象とするノード選択問題の詳細を示す。2 次元空間上に、 p 個のデータ源 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_p\}$ と、 q 個のノード $N = \{n_1, n_2, \dots, n_q\}$ が存在し、各データ源とノードの位置をそれぞれ $L_S = \{l_{s_1}^{\vec{}}, l_{s_2}^{\vec{}}, \dots, l_{s_p}^{\vec{}}\}$, $L_N = \{l_{n_1}^{\vec{}}, l_{n_2}^{\vec{}}, \dots, l_{n_q}^{\vec{}}\}$ とする。ただし、ノードは移動するため、 $\{l_{n_1}^{\vec{}}, l_{n_2}^{\vec{}}, \dots, l_{n_q}^{\vec{}}\}$ は時間経過にともない変化する。また、データ源自身は自身の位置を認識している必要はないが、各ノードは自身の位置を Global Positioning System (GPS) デバイスなどを用いて認識しているものとする。ノードは PDA や携帯電話などが考えられる。PDA は GPS の標準搭載型や、GPS カードの整備が進んでおり、また、総務省の情報通信審議会は、2007 年度以降に発売される 3G 携帯電話は、原則 GPS デバイスを搭載するよう義務づけている¹²⁾ ため、この仮定は妥当であるといえる。データ源 s_i の位置やノード n_j の位置は $l_{s_i}^{\vec{}} = \{x_{s_i}, y_{s_i}\}$, $l_{n_j}^{\vec{}} = \{x_{n_j}, y_{n_j}\}$ という 2 次元座標で表されるが、3 次元空間でも一般性は失われない。

PE は、自身が配備されているノード n_c (ただし $n_c \in N$) 上から、 S に含まれる各データ源が保持するデータを収集するものとする。データ源から 1 回のデータ取得で得られるデータ量を $A_S = \{a_{s_1}, a_{s_2}, \dots, a_{s_p}\}$ とする。データ源は RF-ID リポジトリや無線通信可能なセンサ群であり、無線通信範囲内にいるノードのみデータを取得できる。単純のために、データ源 s_i から一定距離 d_i 以内に位置するノードがデータを取得できるものとする。 d_i はデータ源にアクセスする近距離無線方式やその通信デバイスの出力強度によって決定される。 $l_{s_i}^{\vec{}}$ と $l_{n_j}^{\vec{}}$ の間の距離を $distance(l_{s_i}^{\vec{}}, l_{n_j}^{\vec{}})$ とすると、 $distance(l_{s_i}^{\vec{}}, l_{n_j}^{\vec{}}) \leq d_i$ を満たすようなノード n_j を、 s_i のデータ提供ノードと呼び、 s_i のデータ提供ノードの集合を N_{s_i} (ただし $N_{s_i} \subseteq N$) と表す。各データ源は識別子を持ち、ノードはどのデータ源にアクセスしているかを識別できるものとする。識別子はセンサや RF-ID の識別子を用いる。 N_{s_i} の要素は、ノードが s_i の通信範囲内に入退することによって入れ替わる。 s_i のデータ提供ノード n_j ($n_j \in N_{s_i}$) から n_c までの間にマルチホップによる通信経路が存在する場合、PE はネットワーク経由で s_i のデータを取得できる。

あるデータ源にアクセス可能なノードが複数ある場合、アクセス可能なノード中から代表ノードを選出し、代表ノードのみがデータ源からデータを取得し PE に報告するアプローチと、アクセス可能なノードすべてがデータを取得し PE に報告するアプローチが考えられる。前者の場合、代表ノードを選出する遅延が生じる。すべてのノードは独立的に移動しており、あらかじめアクセス可能なノードを知ることは困難であるため、PE がデータクエリを送信した時点でアクセス可能なノード群を調べ、代表ノードを選出する必要がある。そ

の場合、ノード検索クエリとタイムアウトを用いてアクセス可能なノード群を調べるため、遅延が生じる。そのため、クエリ送信時からデータを取得するまでの遅延時間が増大し、得られるデータの鮮度が落ちる。また、遅延時間中にアクセス可能なノード群が変更になる可能性も高まってしまふ。アクセス可能なノード群が変更になった場合、代表ノードを再選出することとなり、遅延時間がさらに増大し、さらに通信量も増加してしまふ。後者の場合、複数のノードからデータを送信する通信オーバーヘッドが生じるものの、代表ノード選出や再選出に起因する遅延時間が生じず、前者の場合と比較して、得られるデータの鮮度は高い。本論文では、PE は複数のデータ源から得られたデータを集約、融合するアプリケーションを想定しているため、文献 5)、10) と同様に、遅延の少ない後者のアプローチを採用した。また、本論文で提案する配備ノード選択指標は前者のアプローチにも適用可能である。

PE によるデータ収集の概要を図 2 に示す。図 2 は 5 つのデータ源 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_5\}$ と 12 個のノード $N = \{n_1, n_2, \dots, n_{12}\}$ が存在している。 n_4 上に PE が配備されデータ収集を行っているため $n_c = n_4$ となる。データ源を中心とした破線の円は、そのデータ源の通信範囲を表しており、円内に位置するノードはそのデータ源にアクセス可能である。図 2 では、 $N_{s_1} = \{n_1, n_2, n_3\}$ 、 $N_{s_2} = \{n_6, n_7, n_8\}$ 、 $N_{s_3} = \{n_{10}, n_{11}\}$ 、 $N_{s_5} = \{n_{12}\}$ の合計 9 個のデータ提供ノードがある。 s_4 の半径 d_i 以内にはノードがないため、この時点では PE は s_4 からデータを収集できない。また、 s_5 のデータ提供ノード n_{12} が存在するが、 n_{12} は n_c までの通信経路を持たないため、PE は s_5 からデータを収集できない。したがって、図 2 の時点では、PE は s_1, s_2, s_3 の 3 つのデータ源に関するデータを延べ 8 つのノード

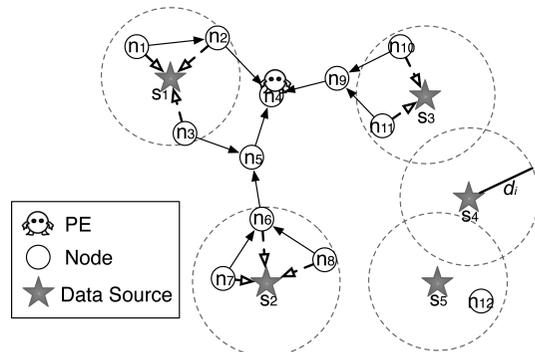


図 2 データ収集の概要

Fig. 2 Overview of data retrieval.

から取得している。 n_c を適切に選択することによって、各データ提供ノードからのデータ転送によって生じる通信量を低減させることが可能である。本論文では、 n_c を選択するためのノード選択指標を提案することで、通信量を低減させることを目指す。

3. 既存のノード選択指標

これまでに提案されたノード選択指標は、ノード情報に基づいている。ネットワークトポロジや位置情報などに基づいた指標が提案されている。

ネットワークトポロジに基づいた指標では、ネットワークの構造に基づいて最適なノードを選択する。DCA プロトコル⁶⁾では、1 ホップで通信可能なノード数を指標とし、ノード数が最多のものを選択している。DCA プロトコルの指標では孤立しにくいノードを選択できるが、通信ホップ数まで考慮しておらず、データ通信量の最適化は行えない。文献 7) では、すべてのノードとの通信ホップ数が閾値以内で収まるノードを選択する手法を提案している。しかし、ホップ数の閾値に関する設定方法については言及しておらず、最適な d を設定することは難しい。TASC プロトコル⁸⁾では、ネットワークトポロジを考慮したノード選択指標を提案している。各ノード間が最短経路で通信を行った場合、最も多く通信経路として使用されるノードを選択する。まず、任意の 2 ノード間の最短経路に含まれるノードに対し重みを 1 増やす。この重み計算をすべての 2 ノード間について行い、重みを指標として、重みが最大となるノードを選択する。さらに、TASC では、ノード間距離の違いも考慮に入れた指標を提案している。あるノード n_k が別の 2 ノード n_i, n_j 間の最短経路に含まれ、その経路における n_k の前後のノードが n_a, n_b であるとき、 $length_{a,k}$ 、 $length_{k,b}$ をそれぞれ n_a, n_b と n_k 間の距離、 $length_{ij}$ を n_i, n_j 間の最短経路の距離として、 $w_{ij} = \frac{length_{a,k} + length_{k,b}}{length_{ij}}$ とし、 w_{ij} だけ n_k の重みを増やす。TASC の指標を用いることで、 n_c とそれ以外のノード間での通信経路を最適化できる。

位置情報に基づいた指標では、各ノードの位置情報に基づいて最適なノードを選択する。GRID プロトコル⁹⁾や GeoBee⁵⁾では、指定された地域内の重心とノード間の距離を指標とし、その重心に最も近いノードを選択している。また、EnviroTrack¹⁰⁾では、一定期間内に通信を行ったすべてのノードの位置情報を集め、それらの位置の重心への近さを指標とし、その重心に最も近いノードを選択している。これらの位置情報に基づいた指標では、ノードの位置情報を必要とする。

しかし、これまでに提案されてきた指標では、ネットワーク内を流れるデータ量については考慮しておらず、データ源の配置や提供データ量にばらつきがある場合、通信量が最少と

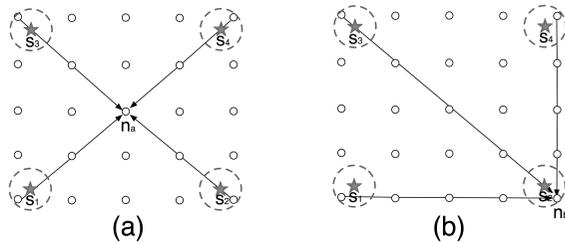


図3 単純なデータ収集環境例
Fig.3 Simple enviroment for data retrieval.

なるようなノードを選択することができない。たとえば、図3で示すように、座標(0,0)から(200,200)で表される200m四方の平面上に、25個のノードが50m間隔で5×5の格子上に均等に並んでいる、非常に単純な例を考えてみる。各ノードは周辺8ノードと通信可能であるとする。また、4つのデータ源 $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ の配置がそれぞれ $L_S = (10, 10), (190, 10), (10, 190), (190, 190)$, $d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = 15\text{m}$ であるとする。

TASCの指標を用いる場合、ネットワークトポロジ的に中央のノードの評価値が高くなるため、地域内中央に位置するノード n_a が選ばれる。また、EnviroTrackの指標を用いる場合、データ源にアクセスし、データを送信するノード群の重心に近いノードの評価値が高くなるため、やはり地域内中央に位置するノード n_a が選ばれる。しかし、もし右下のデータ源 s_2 が他の3つのデータ源より多いデータ量を提供する場合、 n_a は通信量が最少となるようなノードとはならない。各データ源が単位時間あたりに提供する通信データ量をそれぞれ $A_S = (d, 5d, d, d)$ とし、通信ホップ数と通信データ量の積を通信量とすると、図3(a)に示すように n_a にPEを配備した場合、単位時間あたりの通信量は $16d$ 、図3(b)に示すように n_b にPEを配備した場合、単位時間あたりの通信量は $12d$ となり、 n_b にPEを配備した方が通信データ量を25%小さくすることができる。したがって、データ源が提供するデータ量が均でない場合、本章で紹介した指標では通信データ量が最少となるようなノードを選択するのに十分ではない。

4. COLOR

本章では、データ源の情報に基づいたPE配備ノード選択指標COLORを説明する。また、COLORを算出するために必要なパラメータの取得方法を示す。

4.1 COLORの詳細

COLORとは、データ源の情報に基づいた配備ノード選択指標である。COLORはデータ通信量の推定量を表す。COLORを算出する関数は、ノードの位置を入力とし、そのノードにPEを配備した場合のCOLORを返す。COLORは、現在利用可能なデータ源のメタデータから算出される。あるデータ源 s_i からデータを収集する場合に生じるCOLORは、次の2つのメタデータに比例する。

- s_i と n_i 間の距離
- s_i の提供データ量

データ源までの距離が長くなる場合、通信ホップ数が増加するためCOLORは大きくなる。また、各データ源が提供するデータ量が多くなるほど、COLORは大きくなる。COLORを算出する関数は、データ源の位置と提供データ量を用いて定義され、入力された位置の各データ源への距離を、そのデータ源が提供するデータ量で重みをつけて、その総和をCOLORとする。

COLOR関数の詳細を述べる。ネットワークを介してアクセス可能なすべてのデータ源に対して、そのデータ源の提供データ量と、入力された位置とそのデータ源の距離との積の総和をCOLORとした。ある時点においてネットワークを経由してアクセス可能なデータ源集合を $S' = \{s_1, s_2, \dots, s_{p'}\}$ ($S' \subseteq S$)、それらのデータ源の位置と提供データ量を、それぞれ $L_{S'} = \{\vec{l}_{s'_1}, \vec{l}_{s'_2}, \dots, \vec{l}_{s'_{p'}}\}$, $A_{S'} = \{a_{s_1}, a_{s_2}, \dots, a_{s_{p'}}\}$ とすると、位置 l を入力とする関数 $F_{COLOR}(\vec{l})$ を式(1)のように定義する。

$$F_{COLOR}(\vec{l}) = \sum_{s_i \in S'} (a_{s_i} \times \text{distance}(\vec{l}, \vec{l}_{s_i})) \quad (1)$$

$F_{COLOR}(\vec{l})$ の値が小さいほど、その位置のノードにPEを配備した場合に、データ収集によって生じる通信量が少ないことを表す。PEは各ノードの位置情報を収集し、対応するCOLORを算出し、COLORが最小となるノードを n_c として選択する。

2つのデータ源配置例における位置に対するCOLORの分布を示す。図3と同等なノードとデータ源の配置において、各データ源の提供データ量が単位時間あたりの10kBの場合(scenario 1)と、 s_2 の提供データ量だけが50kBになった場合(scenario 2)の、式(1)に基づいたCOLOR分布を図4に示す。色が濃い箇所がCOLORが小さい位置であることを表している。scenario 1の場合、提供データ量が同等である4つのデータ源が4隅に配置されているため、4つのデータ源の重心である(100, 100)が最小となっている。しか

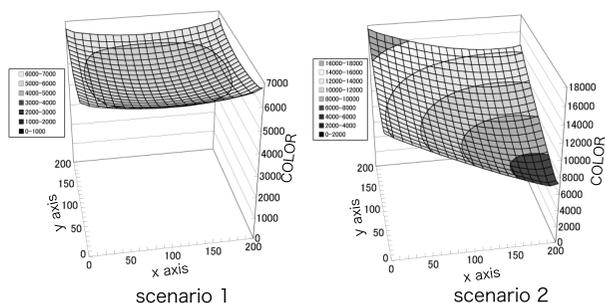


図 4 例における COLOR 分布

Fig. 4 Distribution of COLOR in the examples.

し, scenario 2 の場合は, 他のデータ源より 5 倍の量のデータを提供している s_2 に近い (190,10) が COLOR が最小となる位置となっている. COLOR に基づくと, 2.2 節におけるノード配置の場合, 2.2 節における議論と同様に, n_b が n_c として選択される.

2.1 節で示した配備フェーズにおいて, PE はネットワーク内にノード検索クエリをフラッディングし, 各ノードの位置を問い合わせる. PE は返信があったノードの位置情報と $F_{COLOR}(\vec{l})$ から COLOR を算出し, COLOR が最小となるノードを n_c として選択する.

4.2 COLOR パラメータの動的収集

式 (1) より, COLOR の算出には, PE がネットワークを介してアクセス可能な各データ源の位置 (L_S) とその提供データ量 (A_S) が必要となる. これらのパラメータは, データ収集フェーズにおいて動的に収集可能である. データ源の位置は, そのデータ源のデータ提供ノード群の位置から算出した重心を, データ源の提供データ量は, それらのノードが送信してきた総データ量を使用する.

データ収集フェーズにおいて, s_i のデータ提供ノードは, 取得したデータを PE に送信する際, 自身の現在地も含めて送信する. PE は, s_i のデータを転送してきたデータ提供ノード群の位置情報から重心を割り出し, その重心を \vec{l}_{s_i} として近似する. データ提供ノードの位置を $L_{N_{s_i}} = (l_{n'_1}, l_{n'_2}, \dots, l_{n'_{p'}})$ とすると, \vec{l}_{s_i} は次のように表せる.

$$\vec{l}_{s_i} = \frac{\sum_{\vec{l} \in L_{N_{s_i}}} \vec{l}}{p'} \quad (2)$$

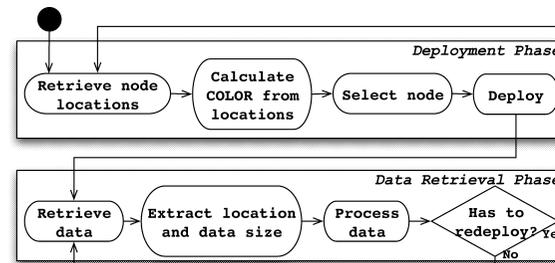


図 5 PE 配備ノードの動作

Fig. 5 Flowchart of a node with PE.

また, 各データ提供ノードが送信してきたデータ量を $A_{N_{s_i}} = (a_{n'_1}, a_{n'_2}, \dots, a_{n'_{p'}})$ とすると, a_{s_i} は次のように表せる.

$$a_{s_i} = \sum_{a \in A_{N_{s_i}}} (a) \quad (3)$$

各データ源に対し式 (2), (3) を適用し, $L_{S'}$ と $A_{S'}$ を導出し, 各ノードごとの COLOR を算出する際に利用する.

4.3 各ノードの動作

COLOR に基づく再配備を適用した場合における各ノードの動作概要を示す. ノードは, PE 配備ノードと通常のノードの 2 種類に分けられる.

データ収集を開始する場合, データ収集者は自身のノード上で PE を起動する. PE 配備ノードの動作を図 5 に示す. 2.1 節で示した一般的な PE の動作概要と比べ, COLOR に基づく再配備を行う PE の場合の相違点を述べる. データ収集フェーズでは, 一般的な PE はデータを収集しデータ処理を行うが, COLOR に基づく再配備を行う PE の場合, データ収集後, 収集したデータに含まれるデータ送信ノードの位置情報と, データサイズを保存する. これらの情報は COLOR 算出時に用いられる. 配備フェーズでは, COLOR に基づく再配備を行う PE は, 各ノードの位置情報を収集し, ノードごとに, 収集した位置情報を入力として COLOR を算出し, COLOR が最大のノードを次の配備ノードとして決定する. PE が配備されたノードは PE 配備ノードとしての動作を開始し, 元の配備ノードは通常ノードの動作に移行する.

通常ノードの動作を図 6 に示す. 通常ノードは PE からのクエリを受信することで処理

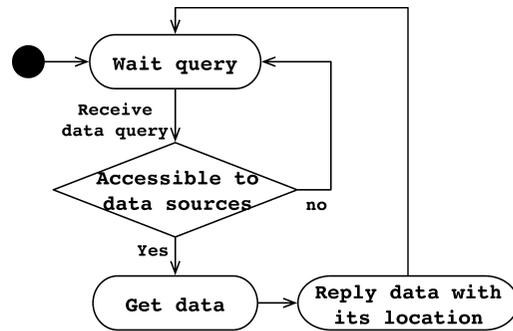


図 6 通常ノードの動作

Fig. 6 Flowchart of a node without PE.

を開始する。クエリを受け取ると、近隣にアクセス可能なデータ源が存在するかをチェックする。アクセス可能なデータ源が存在する場合、データを取得し、自身の位置情報を加えて返信する。

5. 議 論

本章では、ネットワーク情報に基づいた指標および地理情報に基づいた指標の代表である TASC および EnviroTrack を用いた場合と比較し、COLOR に基づいたデータ収集方法の通信オーバーヘッドと計算オーバーヘッドについて論じる。

5.1 通信オーバーヘッドに関する議論

PE 配備先選択では、選択指標に必要な入力データや使用パラメータを収集による際に通信オーバーヘッドが生じる。再配備処理全体の通信量を低減させるためには、この通信オーバーヘッドは小さくしなければならない。まず、入力データの収集に関する通信オーバーヘッドについて論じる。入力データは配備フェーズ時に収集される。 F_{COLOR} を用いた場合、入力データはノードの位置情報である。EnviroTrack を用いた場合も同様に、入力データはノードの位置情報である。これらの場合、再配備フェーズを実行すると、PE はネットワーク内にノード検索クエリをさせ、各ノードの位置情報を収集する。TASC を用いた場合では、各ノードが保存する部分的なトポロジ情報を収集する必要がある。トポロジ情報の収集は、COLOR や EnviroTrack の場合の位置情報収集と同様の手順で行われる。位置情報を 2 次元座標系で表現した場合、1 ノードの位置情報はたかだか十数バイトである。一方で、トポロジ情報は IP アドレスの組で表現すると、2 ノードしか存在しない場合で 16 バ

イト程度であり、ノード数の 2 乗のオーダで増加する。よって、送信されるデータ量はトポロジ情報の方がデータサイズが大きくなるため、TASC の場合の方が大きい。したがって、 F_{COLOR} の入力データ収集によって生じる通信オーバーヘッドは、EnviroTrack の場合と同量かつ、TASC の場合より少量となる。

次に、各指標算出に使用されるパラメータの収集に関する通信オーバーヘッドについて論じる。COLOR 算出に必要なパラメータは、 L_S と A_S である。これらのパラメータは、4.2 節で示したように、データ収集フェーズにおいて動的に収集することができる。PE は、データ提供ノードから送られてくるメッセージ内に含まれるデータ提供ノードの位置と、送信されてきたデータのデータサイズから、 L_S と A_S を導出する。したがって、新たにデータ提供ノードの位置を問い合わせるクエリを送信する必要はないため、パラメータ収集のために送信メッセージ数が増加することはない。しかし、データ提供ノードからデータ送信メッセージに対しそのノードの位置情報を追加する必要がある。したがって、通常のデータ収集時と比べ、各ノードの位置情報分だけメッセージサイズが大きくなり、通信オーバーヘッドが増加する。EnviroTrack の指標を算出する場合も、COLOR 算出と同様に、データ提供ノードの位置情報を必要とする。したがって EnviroTrack の場合も、データ提供ノードの位置を収集する必要があるため、COLOR 算出に必要なパラメータの収集オーバーヘッドは、EnviroTrack と同様である。TASC の場合、ネットワークトポロジを計測するためにすべてのノードが定期的に周辺ノードに hello メッセージを送信しなければならない。文献 13) では、同様にトポロジ計測の通信オーバーヘッドの大きさについて述べている。1 km 四方の地域に 14^2 個のノードが存在し、地域内にグリッド状に配置された 16 個のデータ源からそれぞれ毎分 10 kB のデータを収集する場合に、30 秒間隔でトポロジ計測のための hello メッセージを送った場合、トポロジ計測のオーバーヘッドは、データ計測の通信量に対して 50% も生じることが報告されている。たとえば、同様にネットワークトポロジを計測する OLSR プロトコルにおいては、トポロジ計測のためのメッセージは 2 秒間隔で送信される¹⁴⁾ ため、文献 13) の場合の 15 倍もの通信オーバーヘッドが必要となる。よって、TASC を用いた場合、トポロジ計測のために非常に大きな通信オーバーヘッドが生じる。したがって、COLOR を用いた PE によるデータ収集では、再配備のための総合的な通信オーバーヘッドを他の指標と比べ抑えることができる。

5.2 計算オーバーヘッドに関する議論

次に、指標計算のための計算オーバーヘッドについて論じる。2.1 節で示したように、PE は配備フェーズにおいて配備ノード選択を行うが、この際、配備に最適なノードを算出する

計算オーバーヘッドが生じる．この計算オーバーヘッドは配備先の候補となるノード数の増大とともに大きくなる．計算オーバーヘッドが増大すると最適ノード算出に関する収束時間が増大し，再配備処理に起因する処理遅延が増大してしまう．本節では，COLOR 算出に関する計算オーバーヘッドを他の指標の場合と比較する．

COLOR に関連する計算オーバーヘッドは，COLOR の計算に関するオーバーヘッドとデータ源の位置と提供データ量算出に関するオーバーヘッドに分けられる．COLOR の計算オーバーヘッドは，ネットワークを介してアクセス可能なデータ源の数を p ，配備先の候補となるノード数を q ，2 座標間の距離を計算するコストを $C_{distance}$ とすると，式 (1) に基づき， $pqC_{distance}$ と表せる．式 (1) を用いるためには，あらかじめデータ源ごとの位置と提供データ量を算出する必要がある．しかし，4.2 節で示したように，データ源ごとの位置と提供データ量の算出は，データ収集フェーズで実行可能であるため，配備ノード選択時には算出する必要がない．

EnviroTrack の評価値算出オーバーヘッドは，データ源にアクセス可能なノード数 q' とすると， $q'qC_{distance}$ と表せる．ネットワークを介してアクセス可能なデータ源の数は，そのデータ提供ノードの数より少ないため $q' \geq p$ と表せる．したがって，COLOR 算出の計算コストは EnviroTrack の算出コスト以下である．

また，TASC の場合，任意の 2 ノード間の経路情報を基に算出するため計算オーバーヘッドは $q^2(3C_{distance})$ と表せる．一般にデータ源の数よりノード数の方が多いため $q > p$ と表せる．したがって，TASC と比べた場合，COLOR 算出の計算コストは小さい．

6. 評価

本章では，シミュレーション結果に基づき COLOR に基づいたデータ収集の性能評価を行う．まず，COLOR の精度を評価した．また，データ収集効率の観点から EnviroTrack，TASC と比較することで，COLOR に基づいた配備ノード選択を評価する．各指標に基づいて選択されたノードに PE を配備した場合のデータ収集効率を比較するために，静的なネットワークで評価を行う．最後に，パラメータ取得のオーバーヘッドも含めて，COLOR に基づいたデータ収集の総合的な評価を動的なネットワークの場合で行う．シミュレータは SWANS¹⁵⁾ 上に実装した．

6.1 シミュレーション設定

シミュレーションの設定を示す．4.1 節で示した scenario 2 と同様に，(0, 0)，(200, 200) で表される 200 m × 200 m の平面上に 4 つのデータ源 (s_1, s_2, s_3, s_4) が配置されてい

る．各データ源は無線センサネットワークを想定している．センサネットワークは固定的に設置されているため移動せず，定期的に計測したデータを報告するため一定量のデータを提供し続ける．各データ源の位置は $l_{s_1} = (10, 10)$ ， $l_{s_2} = (190, 10)$ ， $l_{s_3} = (10, 190)$ ， $l_{s_4} = (190, 190)$ であり，提供データ量は $a_{s_1} = a_{s_3} = a_{s_4} = 10 \text{ kB}$ ， $a_{s_2} = 50 \text{ kB}$ である．各データ源の半径 15 m 以内に位置するノードはデータを取得可能である．各ノードは IEEE802.11b 準拠の無線通信デバイスを備えた PDA を想定しており，約 70 m 以内に位置するノードと通信を行うことができる．また，PE は 30 秒ごとにデータ取得クエリを送信し，データ収集を 30 分行った．1 回のデータ取得で得られる情報量を 1 とし，最終的に PE が取得した総取得情報量と，全ノードの総送信データ量を計測した．

6.2 選択指標の評価

ノードが均一に配置されている場合において COLOR の精度を評価する．図 4 における scenario 2 に基づき，PE の配備ノードを変化させた場合の総送信データ量を計測し式 (1) に基づく COLOR と比較することで精度を評価した． 5×5 の格子上に 25 個のノード (n_1, n_2, \dots, n_{25}) が位置している環境において，これら 25 個のノード中から PE を配備するノードを選択する場合を考える．PE の配備ノードを $n_c = n_i$ としてシミュレーションを行い，総取得情報量あたりの総データ通信量を計測した．各ノードに PE を配備した場合のデータ収集による通信量を純粋に評価するため，ノードは移動せず，再配備も行わないものとする． i を 1 から 25 まで変更した場合における各シミュレーション結果を各ノードの位置 (l_1, l_2, \dots, l_{25}) にプロットしたグラフを図 7 に示す．

図 7 で示した通信効率の実測値は，図 4 の scenario 2 で示した COLOR と類似した傾向を示している． s_2 に最も近い (200, 0) に位置するノードを n_c とした場合，単位情報量あたりの総データ通信量は最少となり， s_2 から遠ざかるにつれて増大している．しかし，その増大の割合は実測値の場合と COLOR の場合で異なる． n_c を (100, 100) に位置する n_a とした場合と，(200, 0) に位置する n_b とした場合における F_{COLOR} による評価値とシミュレーションによる計測値を表 1 に示す．COLOR で比較すると， $n_c = n_b$ の場合と比べ， $n_c = n_a$ の場合は通信量は 34.8% 低減しており，シミュレーション結果で比較すると，45.7% 低減している．COLOR による予測値より，シミュレーション結果の方が，より大きく通信量が増加している．あるデータ源 s_i からデータを取得する際に生じる通信量は，COLOR の場合そのデータ源からの距離に比例して増大するとした．だが実際は，実際には転送経路長が長くなるほど，メッセージ喪失の確率が高まるため，距離に対する通信量増加の割合は COLOR 以上に大きくなる．したがって，COLOR は，通信量の傾向はとらえ

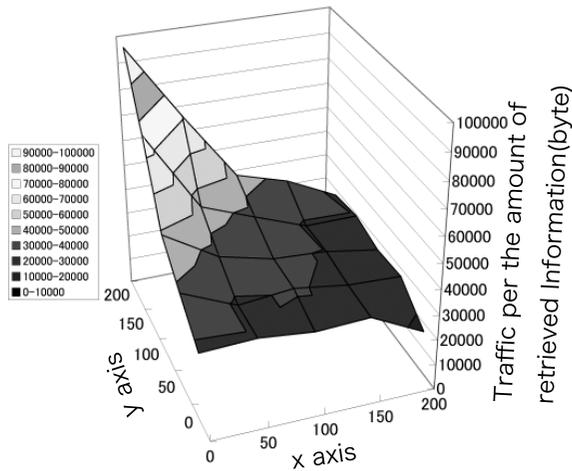


図 7 総取得情報量あたりの総データ通信量の n_c 位置ごとの変化
 Fig.7 Network traffic per the unit of retrieved information (changing n_c).

表 1 COLOR と実測値の比較
 Table 1 Comparison of simulation results with COLOR.

l_{n_c}	$F_{COLOR}(l_{n_c})$	計測値
(100, 100)	10748	30880
(200, 0)	7012	16779
比	-34.8%	-45.7%

られるが、通信量変化の割合については精度は高くない。

しかし、配備ノード選択では通信量が最少となるノードが選択できればよい。したがって、COLOR は通信量の傾向を把握し、通信量が最少となるノードが判定できればよい。TASC や EnviroTrack に基づくと (100, 100) に位置するノードが選択されるのに対し、COLOR に基づくとシミュレーションで最少の通信量を示した (200, 0) に位置するノードが選択できた。ノードの配置が均一な今回のシナリオの場合、COLOR はシミュレーション結果と同様の傾向を示し、COLOR に基づくことで通信量が最少となる n_c を選択することが可能となる。

6.3 ランダム配置時におけるデータ収集効率の評価

本節では、各指標に基づいた配備ノード選択の効果を評価する。各ノードをランダムに

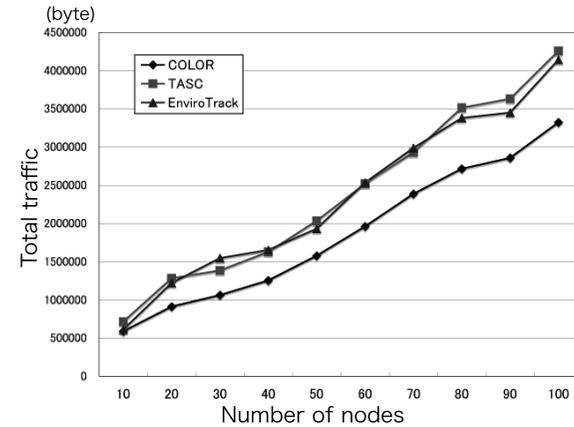


図 8 ノード数に対する総データ通信量の変化
 Fig.8 The total amount of transferred data (changing density).

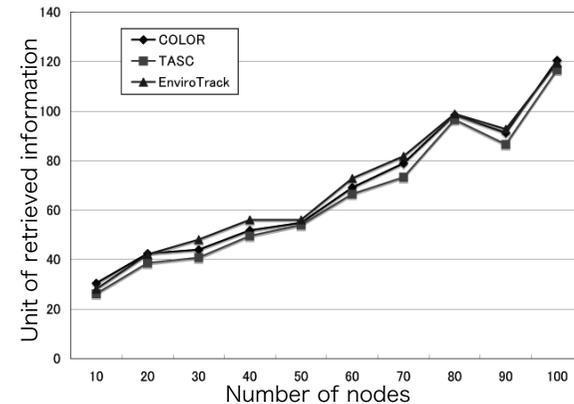


図 9 ノード数に対する総取得情報量の変化
 Fig.9 The amount of retrieved information (changing density).

配置し、ノード密度を変化させた場合において、EnviroTrack、TASC と比較することで、COLOR による配備ノード選択のデータ収集効率を評価する。ノード数を 10 から 100 まで 10 ずつ変更してシミュレーションを行った。全ノードの総データ通信量を図 8 に、PE の総取得情報量を図 9 に、総取得情報量あたりの総データ通信量を図 10 に示す。また、それ

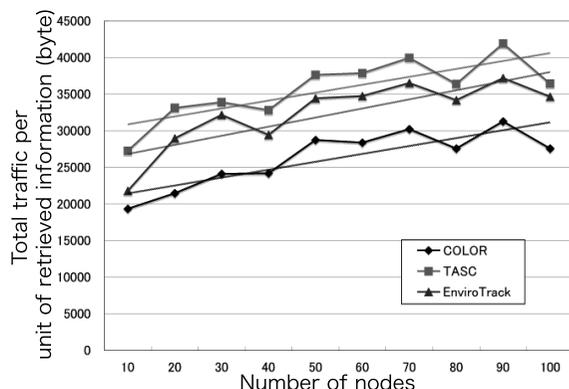


図 10 ノード数に対する総取得情報あたりの総データ通信量の変化
Fig. 10 Energy efficiency in the static environment.

表 2 静的環境における COLOR と他の指標の相対値 (%)

Table 2 Relative value of COLOR results in the static environment (%).

# of nodes	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	average
Traffic to TASC	-21.1	-40.5	-30.4	-29.8	-29.0	-28.4	-22.7	-29.5	-27.1	-28.1	-28.7
to EnviroTrack	-4.1	-33.8	-45.7	-31.7	-22.5	-29.1	-25.2	-24.5	-20.8	-24.7	-26.2
Inforamtion to TASC	14.04	8.98	7.34	4.28	1.52	3.86	7.21	1.95	5.13	3.11	5.47
to EnviroTrack	7.69	0.87	-9.13	-8.27	-2.23	-5.38	-3.61	-0.44	-1.56	0.81	-2.12
Efficiency to TASC	-41	-54.4	-40.7	-35.6	-31	-33.5	-32.2	-32.1	-34	-32.2	-36.7
to EnviroTrack	-12.7	-35	-33.5	-21.6	-19.8	-22.5	-20.8	-24	-18.9	-25.8	-23.5

ぞれの場合における COLOR と TASC, EnviroTrack との比を表 2 に示す。

図 8, 図 9 から, ノード数の増加にともない, 総データ通信量や取得情報量が増加することが分かる。これは, ノード数が増えることによりネットワークが広域に広がり, 各データ源にアクセス可能なノード数が増えるためである。TASC を用いた場合と比べ, COLOR を用いた場合の取得情報量は平均で約 5.47% 多い。これは COLOR や EnviroTrack は, ネットワーク内でデータを取得可能なデータ源の位置から PE 配備ノードを選択しているのに対し, TASC はネットワークポロジしか考慮していないためである。総データ通信量を比較すると, ノード数が 10 の場合, 各指標間はほぼ同様の結果となっている。ノード数が 10 という, 密度が小さい場合, データを取得可能なデータ源が存在しない場合や, 単独のデータ源にしかアクセスできない場合が多くなる。その場合, 通信データ量が非常

に少なく, データ通信量を低減させる余地が小さくなる。しかし, ノード数の増加にともない, COLOR を用いた場合のデータ通信量は他の場合より小さくなっていることが分かる。ノード数 40 から 100 という取得情報量が多い場合では, TASC や EnviroTrack と比べ, COLOR では平均でそれぞれ約 28.7%, 約 26.2% 通信量が低減している。これは, ノード数が増加することで, データ源にアクセス可能なノード数が増加し, 複数のデータ源からデータを取得できるようになるため, PE 配備ノード選択によりデータ通信量を低減させる余地が大きくなるためである。TASC に基づいたノード選択ではネットワークポロジを考慮して PE 配備ノードを選択している。これはすべてのノードが同量のデータを送信する場合には, 総データ通信量が最少となるノードを選択できる。しかし, 実際にデータを送信するノードはデータ源にアクセス可能なノードのみであり, データ源の提供データ量によって異なるため, 各ノードが送信するデータ量は同量ではない。したがって, TASC では正確に通信データ量を見積もれない。また, EnviroTrack では各データ源の位置情報に基づいているものの, データ源から得られるデータ量を考慮していないため, データ源の提供データ量にばらつきがある場合, 正確に通信量を見積もれない。COLOR に基づいたノード選択では, 各データ源にアクセスしたノードが送信してきたデータサイズの総計を基に PE 配備ノードを選択しているため, 提供データ量にばらつきがある場合でも通信量が少ないノードを選択することが可能となる。

次に, データ収集の効率を比較する。総取得情報量あたりの総データ通信量をデータ収集効率の比較指標とする。結果を図 10 に示す。直線は最小二乗法による近似直線を示している。データ収集効率で比較した場合, COLOR は, 総取得情報量が少なくデータ通信量が多い TASC と比べ平均約 36.7%, 総取得情報量はほぼ同量でデータ通信量が多い EnviroTrack と比べ平均約 23.5% 効率良くデータを収集することができる。

以上のことから, ノード数が多く, 広域の地域に分散されて配置されている複数のデータ源からデータを収集する場合, COLOR 指標を用いることが有効であることが分かる。特に, データ源ごとの提供データ量にばらつきがある場合, 他の指標と比べて効率良くデータを収集することが可能となる。

6.4 データ収集の評価

配備ノードを動的に変更してデータ収集した場合のデータ収集効率について各指標を比較する。各ノードは人間が移動所持しているものとし, 各ノードの移動モデルには酔歩モデル¹⁶⁾を用いる。本シミュレーションの酔歩モデルでは, 各ノードは, 進行方向をランダムに決定し, 10 秒かけて 0 m から 20 m までのランダムな距離を移動し, 再度進行方向を

ランダムに決定するという手順を繰り返す．再配備先選択指標の比較に着目するため，再配備条件は単純な時間経過による条件を採用した．PE は 30 秒ごとに再配備処理を開始する．TASC を用いた場合，ネットワークトポロジを計測するため，各ノードは 30 秒ごとに hello メッセージを送信する．

総取得情報量あたりの総データ通信量を図 11 に示す．TASC に基づいたデータ収集のデータ収集効率は，ノード数が増えるに従って，6.3 節の結果より大きい割合で悪化している．TASC と比べると，ノード数が 100 の場合，COLOR を用いたデータ収集のデータ収集効率は 6.3 節の静的環境では 32.2% 向上したのに対し，本節の動的環境では 77.6% 向上している．TASC はノードトポロジ情報を入力とするため，動的環境では各ノードは定期的に hello メッセージを送信してトポロジを計測しなければならない．ノード数が増加することにより hello メッセージの通信量が膨大になり，TASC を用いた場合のデータ収集効率を悪化させている．一方で，COLOR はデータ源の位置や提供データ量を必要とするが，これらのデータはデータ収集フェーズ中に同時に取得可能なため余計なメッセージ送信を必要としない．したがって，入力データを収集するための通信オーバーヘッドは TASC の場合より非常に小さい．

EnviroTrack と比べると，ノード数が 100 の場合，COLOR を用いたデータ収集のデータ収集効率は 6.3 節の静的環境では 25.8% 向上したのに対し，本節の動的環境では 32.5% 向上している．動的環境では，定期的に，PE は比較候補となるノードから各指標に基づいて

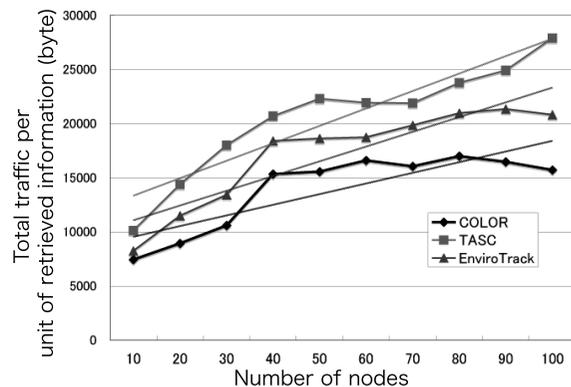


図 11 ノード数に対する総取得情報量あたりの総データ通信量の変化

Fig. 11 Energy efficiency in the dynamic environment.

評価値が最良となるノードを選択する．その評価値が現在の n_c の評価値より良い場合，PE は再配備を行う．EnviroTrack の指標では PE 再配備後のデータ通信量を正確に予測できないため，データ収集効率がより悪化するノードへ再配備してしまう可能性がある．再配備処理自体も通信オーバーヘッドを生じさせるため，再配備後のデータ収集効率は再配備前より向上していなければ，データ収集処理の総合的なデータ収集効率はより悪化してしまう．COLOR ではデータ通信量の傾向を把握し，データ通信量最少のノードを判定できるため，よりデータ収集効率の良いノードに再配備することができる．したがって，動的環境では，COLOR に基づいたデータ収集は他の指標に基づく場合と比べ，静的環境より効率を向上させることができる．

7. おわりに

本論文では，MANET において，複数のデータ源からデータを収集するネットワーク内処理のための配備ノード選択指標 COLOR を提案した．COLOR は，各ノードに PE を配備した場合に生じるデータ通信量の推定値を表し，データ源の位置や提供データ量に基づいて，算出される．既存の指標と比べ，COLOR ではデータ源の位置や提供データ量にばらつきがある場合でも各ノードにおける通信データ量の傾向を把握することができる．COLOR が最小となるノードをネットワーク内処理の配備ノードとすることで，データ収集による通信量を低減させることができる．また，COLOR 算出に必要なデータは，本来のデータ収集プロセス中に収集可能であり，生じる通信オーバーヘッドは小さい．COLOR に基づいた配備ノード選択をすることで，データ源から得たデータをマルチホップ転送する際の総転送データ量を低減し，効率の良いデータ収集が行える．特に，PE を動的に再配備する場合には，少量の通信オーバーヘッドで入力データを収集可能な COLOR を用いることで，他の指標に基づいた場合と比べ，データ収集効率をより向上させることが可能となる．

データ通信量をさらに低減させるためには，PE 配備ノード選択指標だけでなく，再配備条件との組合せを考慮する必要がある．再配備処理時には，PE が保有するデータ処理プログラムや取得済みのデータを次の配備先ノードに送信する必要がある．したがって，再配備による通信オーバーヘッドを低減させるためには，再配備の頻度を最小限にとどめなければならない．再配備の頻度を最小限にとどめるためには，再配備の前後でのデータ収集による通信量の変化と，再配備自体によって生じる通信量を推定し，再配備を決定する必要がある．今後は，COLOR に基づいた再配備条件を提案することにより，データ通信量を低減させることを目指す．

参 考 文 献

- 1) Madden, S., Franklin, M.J., Hellerstein, J.M. and Hong, W.: TAG: A Tiny Aggregation Service for Ad-Hoc Sensor Networks, *Proc. 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, New York, NY, USA, pp.131–146, ACM Press (2002).
- 2) Chen, G. and Kotz, D.: Policy-Driven Data Dissemination for Context-Aware Applications, *Proc. 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, Kauai, Hawaii, pp.283–289 (2005).
- 3) 首藤幸司, Lambertsen, G., 西尾信彦: コピキタスセンシングネットワークにおける自律的なデータ集約機構, 第8回プログラミングおよび応用のシステムに関するワークショップ (SPA2005), 日本ソフトウェア科学会, pp.216–225 (2005).
- 4) Blum, B., Nagaraddi, P., Wood, A., Abdelzaher, T.F., Son, S. and Stankovic, J.: An Entity Maintenance and Connection Service for Sensor Networks, *Proc. 1st International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys)*, New York, NY, USA, pp.201–214, ACM Press (2003).
- 5) 鄭 顕志, 深澤良彰, 本位田真一: MANETにおける省資源性を考慮した位置依存情報収集手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-D, No.12, pp.2625–2636 (2006).
- 6) Basagni, S.: Distributed Clustering for Ad Hoc Networks, *Proc. 1999 International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPAN '99)*, Washington, DC, USA, pp.310–315, IEEE Computer Society (1999).
- 7) Amis, A.D., Prakash, R., Huynh, D. and Vuong, T.: Max-Min D-Cluster Formation in Wireless Ad Hoc Networks, *INFOCOM*, pp.32–41 (2000).
- 8) Virrankoski, R. and Savvides, A.: TASC: Topology Adaptive Spatial Clustering for Sensor Networks, *Proc. 2nd IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)*, Washington, DC, USA, pp.10–18, IEEE Computer Society (2005).
- 9) Liao, W.-H., Sheu, J.-P. and Tseng, Y.-C.: GRID: A Fully Location-Aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, *Telecommunication Systems*, Vol.18, No.1-3, pp.37–60 (2001).
- 10) Abdelzaher, T., Blum, B., Cao, Q., et al.: EnviroTrack: Towards an Environmental Computing Paradigm for Distributed Sensor Networks, *Proc. 24th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Washington, DC, USA, pp.582–589, IEEE Computer Society (2004).
- 11) Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *Proc. 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Washington, DC, USA, p.8020, IEEE Computer Society (2000).
- 12) 総務省情報通信審議会:「携帯電話からの緊急通報における発信者位置情報通知機能に係る技術的条件」についての報告書 (2004).
- 13) Tei, K., Sommer, C., Fukazawa, Y., Honiden, S. and Garoche, P.-L.: Adaptive Geographically Bound Mobile Agents., *Proc. 2nd International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)*, pp.353–364 (2006).
- 14) Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), RFC 3626 (Experimental) (2003).
- 15) Zhang, X. and Riley, G.F.: Scalability of an Ad Hoc On-Demand Routing Protocol in Very Large-Scale Mobile Wireless Networks, *Simulation*, Vol.82, No.2, pp.131–142 (2006).
- 16) Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.: A Survey of Mobility Models for Ad-Hoc Network Research., *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.2, No.5, pp.483–502 (2002).

(平成 19 年 9 月 7 日受付)

(平成 20 年 2 月 5 日採録)



鄭 顕志

1980 年生。2003 年早稲田大学工学部情報学科卒。2008 年同大学大学院理工学研究科情報・ネットワーク専攻博士課程修了。2006 年早稲田大学理工学部助手。2007 年早稲田大学基幹理工学部助手。2008 年早稲田大学メディアネットワークセンター助教, 2008 年国立情報学研究所アーキテクチャ科学研究系特任助教, 現在に至る。博士(工学)(早稲田大学)。モバイルエージェント, アドホックネットワーク, ソフトウェア工学の研究に従事。



深澤 良彰 (正会員)

1953 年生。1976 年早稲田大学工学部電気工学科卒業。1983 年早稲田大学大学院博士課程修了。同年相模工業大学工学部情報工学科専任講師。1987 年早稲田大学理工学部助教授。1992 年同教授。工学博士(早稲田大学)。ソフトウェア再利用技術を中心としてソフトウェア工学の研究に従事。電子情報通信学会, 日本ソフトウェア科学会, IEEE, ACM 各会員。



本位田真一（フェロー）

1953年生．1978年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了．（株）東芝を経て2000年より国立情報学研究所教授，2004年より同研究所アーキテクチャ科学研究系研究主幹を併任，現在に至る．2001年より東京大学大学院情報理工学系研究科教授を兼任，現在に至る．早稲田大学客員教授，英国UCL客員教授，現在に至る．2005年度パリ第6大学招聘教授．工学博士（早稲田大学）．1986年度情報処理学会論文賞受賞．DICOMO2007最優秀論文賞受賞．日本ソフトウェア科学会理事，情報処理学会理事（教育担当）を歴任．情報処理学会フェロー．IEEE Computer Society Japan Chapter Chair，ACM日本支部会計幹事．日本学術会議連携会員．
